第46卷 第5期
2023年5月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 5
May 2023

2001—2020年蒙古高原昼夜非对称变暖对植被返青期的影响

张港栋[1,2]， 包 刚[1,2]， 元志辉[1,2]， 温都日娜[1,2]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古师范大学内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022）

摘 要： 基于2001—2020年归一化植被指数（NDVI）、增强型植被指数（EVI）2种遥感植被指数以及蒙古高原94个气象站点的月最高、最低温和降水量数据，利用累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法和动态阈值法2种物候识别方法提取蒙古高原植被返青期，分析蒙古高原昼夜非对称变暖的时空变化及其对植被返青期的影响。结果表明：（1）2001—2020年蒙古高原生长季开始前6个月（上一年11月—当年4月）平均最高温[0.7 ℃·(10a)$^{-1}$]和最低温[0.3 ℃·(10a)$^{-1}$]均呈上升趋势，最高温的变暖速率是最低温的2.3倍。（2）季前昼夜非对称变暖对植被返青期均产生提前作用，但与最高温相比，最低温对返青期的影响程度更大，且影响范围更为广泛。（3）季前昼夜非对称变暖对不同植被类型返青期产生不同影响，白天变暖对灌丛、农田和稀疏植被返青期的影响更明显，夜间变暖对森林和草地返青期的影响更强，特别是森林地区（25.5%）。研究白天和夜间非对称变暖对蒙古高原植被物候的影响，对揭示温度对春季植被物候的影响机制有重要意义。

关 键 词： 最高温；最低温；非对称变暖；返青期；蒙古高原

文章编号： 1000－6060(2023)05－0700－11(0700～0710)

植被物候是指示全球气候变化的最重要最敏感指标之一，在气候上的任何微小波动都能够被植被物候变化记录起来[1-2]，因此植被物候与气候变化的关系研究成为当今全球变化研究领域的重点关注方向之一[3-4]。在众多植被物候指标（春季返青期、秋季枯黄期）中，春季返青期是最重要的植被物候指标之一，其变化直接影响着植被年内生长和生物量的累积[5]。如水稻，开花期间较高的最高温，可直接损伤其叶绿体，致使光合作用和花粉产量减少，导致小穗不育而大幅降低产量[6]。返青期对气候变化十分敏感，研究其对气候变化的响应对评估和预测未来植被物候动态变化、深刻理解陆地生态系统碳水循环过程等具有重要意义[7]。温度是影响植被物候变化的重要因素之一[8]。且其影响因植被类型、研究区和温度（如最高气温、最低气温、平均温度）的变化而异[9-10]。

IPCC第六次评估报告指出，当前气候系统的变化主要以全球变暖为主，且在2041—2100年内仍呈持续变暖趋势[11]。同时，全球气候变暖具有昼夜升温不对称以及季节不对称的特征[12]。如夜间温度比白天温度升高的速率要快，导致昼夜温差呈减小趋势[13-14]。在北半球中高纬度地区，夏季变暖速率快于春季和秋季的变化速率[15]，导致气候变化季节不对称现象。国内外大量研究表明，生态系统对气候变化，尤其对温度变化的响应极为敏感和多样化。因此，越来越多的学者通过遥感数据和气象数据分析昼夜非对称变暖对全球植被物候的影响。例如，Piao等[16]的研究表明，在北半球白天增温可以更加有效地完成叶片展开所需的热量积累以及大气CO_2的固定。Shen等[17]进一步研究昼夜变暖对中

收稿日期： 2022-08-13； **修订日期：** 2022-09-30
基金项目： 国家自然科学基金项目（41861021）；内蒙古自治区自然科学基金项目（2021MS04014）资助
作者简介： 张港栋（1997-），男，硕士研究生，主要从事资源环境与遥感研究. E-mail: zgdong9797@163.com
通讯作者： 包刚（1978-），男，副研究员，主要从事遥感与地理信息系统应用研究. E-mail: baogang@imnu.edu.cn

国温带草原返青期季节非对称影响过程发现，在冬季，最高温对返青期影响更大，在春季，最低温对返青期影响更大。Peng等[13]研究发现在北半球寒冷潮湿地带白天温度升高有利于植被生长，而在温带干旱和半干旱区，则不利于植物的生长，夜间增温却是与之相反的情况。然而，在青藏高原地区，Shen等[4]发现植被返青期的变化与最低温升高的关系更为密切，这可能由于较高的最低温可以减轻霜冻破坏，但最高温升高可能会加剧寒冷对干旱地区的影响。与寒冷干燥的青藏高原相比，蒙古高原地区气候更加温暖和干燥，对气候变化极为敏感[18]。该地区植被在春季发育阶段的低温需求和热量累积需求可能很好地适应了过去的温度状况，但无法很好地适应近年来全球持续变暖的温度条件。因此，在干旱的蒙古高原，为了了解温度影响植被春季物候的机制，研究最高温和最低温的变化对春季返青期的影响至关重要。

本文基于2001—2020年蒙古高原94个台站的气象数据、归一化植被指数（NDVI）和增强型植被指数（EVI），分析了最高温和最低温的时空变化，并利用2种不同提取物候方法求其平均值作为返青期，探讨了最高温和最低温对不同植被类型返青期的影响，从而为进一步研究春季物候对区域气候变化的响应提供依据，为不同植被类型返青期对全球非对称变暖响应研究提供案例。

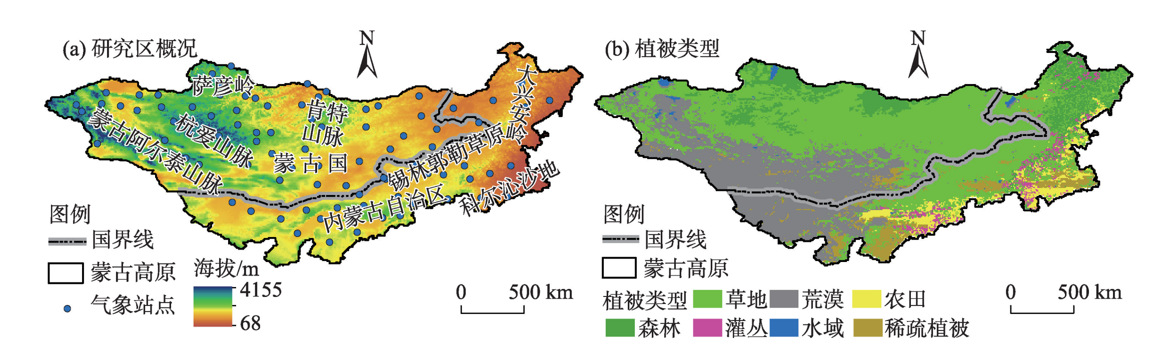
1　研究区概况

本文研究区（87°43′~126°04′E，37°22′~53°20′N）为蒙古高原部分区域，包括蒙古国全域和中国内蒙古自治区（图1a），面积约2.7×10^5 km^2。研究区地势西高东低，西北部多山地，西南部为广阔的戈壁荒漠，中部和东部为一望无垠的丘陵草原，平均海拔约为1580 m。蒙古高原地处亚洲大陆中部，包括蒙古国、俄罗斯南部和中国北方部分地区[19]；东部边缘始于黑龙江省大兴安岭山脉，向西直抵新疆维吾尔自治区阿尔泰山脉，北起萨彦岭、雅布洛诺夫山脉，南至阴山山脉，四周群山环绕，远离海洋，形成封闭的内陆高原[20]。蒙古高原属于典型的干旱半干旱气候类型，冬季漫长而寒冷，夏季炎热且干燥，在西南部戈壁荒漠地区温度最高，而在蒙古国北部和中国内蒙古自治区东北地区温度最低。降水与气温分布相反，在北部和东北部降水最多，年总降水量达到300~400 mm，而在西南则最少，一般低于100 mm[21]。蒙古高原独特的地理位置和气候环境孕育了丰富多样的植被类型。从东北部向西南部依次为森林（蒙古国萨彦岭北部、肯特山脉北部和内蒙古自治区大兴安岭地区）、草地（蒙古国中部和西北部）、戈壁荒漠（蒙古国西南部和内蒙古自治区西南部）、稀疏植被（内蒙古自治区西南地区），农田和灌丛植被主要分布在内蒙古自治区中东部[22]（图1b）。

2　数据与方法

2.1　数据来源

2.1.1　*植被指数数据*　2001—2020年MOD13C1产品中的NDVI和EVI 2种植被指数数据来源于ApPEEARS（https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/），时间分辨率为16 d，空间分辨率为0.05°（约5.6 km）。由于研究区绝大部分地区植被在冬季无生长迹象或受积雪覆盖的原因，每年选取第90~200 d间的NDVI和EVI数据进行研究[23]。为降低戈壁和荒漠



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1600号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　研究区概况及植被类型分布

Fig. 1　Overview of the study area and distribution of vegetation types

等无植被区或植被覆盖度极低地区NDVI和EVI对最终研究结果的影响，将多年平均EVI值小于0.06的地区规定为“无植被区”，不参与分析[24]。

2.1.2 植被类型和高程数据 研究采用MODCD12植被覆盖类型IGBP分类体系和地理空间数据云提供的30 m分辨率的GDEM产品，对数据进行投影变换、裁剪和重采样等，最终得到空间分辨率与NDVI、EVI相匹配(5.6 km)的栅格数据。通过对植被类型数据原始分类进行合并处理，得到森林、草地、灌丛、农田和稀疏植被5种植被类型，用于研究不同植被类型返青期对最高温、最低温的响应特征。

2.1.3 气象数据 气象数据是由蒙古国科学院地理与地质研究生态所和中国气象数据网(http://data.cma.cn/)提供的2001—2020年逐月最高温、最低温和降水量数据，其中蒙古国包括60个气象台站，内蒙古自治区包括34个气象台站。在ArcGIS环境下，运用克里金插值法(Kriging)对94个气象站点数据进行空间插值，获取与NDVI、EVI数据投影相同，像元大小一致的气象栅格图像。综合相关研究和研究区实际情况，将上一年11—12月和当年1—4月规定为季前6个月即多年平均返青期之前的时期，接近非生长季时期[25]。通过数据掩膜、剪取蒙古高原地区逐月最高温(白天温度)、最低温(夜间温度)和降水量数据的栅格图像[26]。

2.2 研究方法

2.2.1 NDVI和EVI数据的平滑重构 为减少云、大气、太阳高度角等因素对90~200 d的NDVI、EVI数据影响，利用谐波时序分析法(HANTS)[27]，分别对原始NDVI和EVI数据进行平滑后作为时间的函数。HANTS法充分考虑植物生长周期与数据自特性的双重特征，能够真实反应时间序列曲线的周期性变化规律，在物候指标研究中得到广泛应用[28]。最小二乘法与傅里叶变换是HANTS算法的核心，由Roerink等[29]在2000年提出，其表达式为：

$$y_i = A_0 + \sum_{j=1}^{m} A_j \sin(\alpha_j + \beta_j),\ i = 1, 2, \cdots, N \tag{1}$$

式中：y_i 为拟合后的NDVI；A_0 为与时间序列平均值相等的谐波的余项；A_j 为各谐波振幅；$\alpha_j = 2j/N$ 为各谐波的频率；β_j 为各谐波初相位；N为时间长度；$m=N-1$，为谐波个数。

2.2.2 累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法 对HANTS法平滑后的NDVI利用Hou等[30]在2014年提出的累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法，在对多年累积NDVI数据进行拟合[式(2)]的基础上，利用式(3)、式(4)计算曲线的曲率(K)，根据曲线曲率极值法，逐像元提取研究区植被的生长季开始日期，将曲率最大值对应的时间(日数)作为其开始日期，即返青期。

$$y(x) = \frac{c}{1 + e^{a + bx}} + d \tag{2}$$

$$K = \frac{d\partial}{ds} = -\frac{b^2 cz(1 - z)(1 + z)^3}{[(1 + z)^4 + (bcz)^2]^{1.5}} \tag{3}$$

$$z = e^{a + bx} \tag{4}$$

式中：$y(x)$ 为儒略日 x 对应的Logistic拟合的累积NDVI；d为背景NDVI；c为累积NDVI的最大值与背景NDVI的差值；a、b为拟合参数；∂ 为单位切线向量在时间x沿可微曲线的角度；s为模拟NDVI曲线的单位长度。

2.2.3 动态阈值法 采用动态阈值法对EVI数据提取物候，由一元六次多项式拟合EVI年变化率和多年平均季节变化率来确定返青期阈值进一步反演其日期。一元六次多项式由Piao等[31]提出，能够很好地逼近滤波后的曲线，且能够逐像元进行计算，在拟合植被整个生长季曲线方面有更好的优势。用4个步骤进行像元级别的计算：(1) 计算多年平均EVI和多年平均EVI的变化率(EVI_{ratio})[式(5)]。(2) 确定返青期的阈值，选取多年平均EVI中原始第t期(EVI_t)和原始第t+1期(EVI_{t+1})的中值作为返青期的阈值，对应多年平均EVI前半年最大比率[32]。(3) 采用一元六次多项式逐年逐像元拟合EVI曲线[式(6)]。(4) 将每年的返青期作为拟合EVI曲线第一次达到返青期阈值的日期。

$$EVI_{ratio}(t) = \frac{EVI_{t+1} - EVI_t}{EVI_t} \tag{5}$$

$$EVI = k + k_1 x + k_2 x^2 + \cdots + k_n x^n \tag{6}$$

式中：x为儒略日；n为多项式的次数，本文为6；k为最小二乘回归拟合系数。

2.2.4 一元线性回归分析 为分析2001—2020年蒙古高原返青期、最高温、最低温、降水量的时空变化趋势，在像元尺度上采用一元线性回归法分析其各自的线性变化趋势[33]，计算公式为：

$$b = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{7}$$

式中：b在不同的趋势分析中分别为最高温、最低温或降水量的趋势斜率，即年际变化率，斜率为正表示温度和降水推迟（上升），斜率为负则表示温度和降水提前（下降）；x_i为第i年的温度（℃）或降水（mm）；i为监测年份；n为研究时间段的年数。

2.2.5 偏相关分析　本研究利用偏相关分析法研究蒙古高原返青期与不同季前长度的最高温、最低温和降水量之间的关系，进一步研究植被返青期的动态变化和昼夜增温之间的不对称关系。偏相关分析是指当2个变量同时与第3个变量相关时，排除第3个变量的影响，仅对其他2个变量之间的相关性进行分析的过程[34]。计算公式如下：

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{8}$$

式中：r_{xy}为要素x和y之间的相关系数；x_i为第i年像元尺度上平均最高（低）温度（℃）或累加降水量（mm）；y_i为返青期（d）；$\bar{x}$为多年季前平均最高（低）温度（℃）或季前累加降水量（mm）；$\bar{y}$为多年平均返青期（d）；n为总年数。

$$r_{y1\cdot23}=\frac{r_{y1\cdot2}-r_{y3\cdot2}\times r_{13\cdot2}}{\sqrt{\left(1-r_{y3\cdot2}^2\right)\left(1-r_{13\cdot2}^2\right)}} \tag{9}$$

$$r_{y2\cdot13}=\frac{r_{y2\cdot1}-r_{y3\cdot1}\times r_{23\cdot1}}{\sqrt{\left(1-r_{y3\cdot1}^2\right)\left(1-r_{23\cdot1}^2\right)}} \tag{10}$$

$$r_{y3\cdot12}=\frac{r_{y3\cdot1}-r_{y2\cdot1}\times r_{32\cdot1}}{\sqrt{\left(1-r_{y2\cdot1}^2\right)\left(1-r_{32\cdot1}^2\right)}} \tag{11}$$

式中：1、2、3分别为最高温、最低温和降水量；$r_{y1\cdot23}$为排除最低温、降水量的影响，最高温和返青期之间的偏相关系数；$r_{y2\cdot13}$为排除最高温、降水量的影响，最低温和返青期之间的偏相关系数；$r_{y3\cdot12}$为排除最高温、最低温的影响，降水量和返青期之间的偏相关系数，其他如此类推。采用t检验方法对偏向关系数进行显著性检验，$P<0.05$为显著相关。

3　结果与分析

3.1　最高温、最低温及降水量的时空变化格局

2001—2020年蒙古高原地区季前6个月的最高温和最低温均呈现不同程度的上升趋势，降水在一定程度上呈下降趋势。最高温平均每10 a升高0.7 ℃，最低温平均每10 a升高0.3 ℃，降水量平均每10 a下降3.2 mm（图2b、d、f）。从变化趋势看，最高温和最低温升高的趋势存在明显差异，最高温升高的速度是最低温升高速度的2.3倍，导致最高温和最低温之间的差距在逐渐增大，这表明研究区昼夜变暖速度不均匀，白天温度增加的趋势远比夜间温度增加的趋势快。

在空间分布上，蒙古高原大多地区的最高温和最低温呈现总体变暖的趋势，最高温的增温速率介于−0.04~0.21 ℃·a^{-1}之间，而最低温的增温速率在−0.13~0.09 ℃·a^{-1}之间。其中，最高温在98.8%的区域呈现出上升趋势，呈下降趋势的地区面积较小，仅占研究区面积的1.2%，主要分布在中国内蒙古自治区呼伦贝尔市陈巴尔虎旗等地区（图2a）。最低温在85.9%的区域呈现出上升趋势，与最高温类似，最低温呈现下降趋势的面积较小，仅占研究区面积的14.1%，主要分布在中国内蒙古自治区西南部、蒙古国杭爱山脉西部和肯特山脉北部等极少数地区（图2c）。因此，蒙古高原昼夜增温趋势在空间上也存在不对称性，特别是在具体区域昼夜增温速率大不相同。降水随纬度变化呈明显带状分布特征（图2e），47°N以南，中国内蒙古自治区绝大部分地区降水呈相应的递增趋势，中部少数地区呈递减趋势；47°N以北，蒙古国绝大部分地区降水呈递减趋势，仅有极少数地区呈增加趋势。

3.2　返青期对最高温、最低温和降水量的响应

蒙古高原平均返青期出现在第110~140 d（92.8%）之间，仅3.5%的地区晚于第140 d（图3）。大部分集中在第125~135 d（76.3%）之间，即返青期主要出现在4月底和5月初，平均返青期为128 d。空间分布规律由东向西返青期在逐渐推迟，返青期发生最早的地区主要在大兴安岭东部，一般早于110 d（3.7%）。而较迟的地区主要位于杭爱山脉，即研究区西北部，约发生在5月中下旬左右。蒙古高原植被返青期空间分布特征与姜康等[35]、邵亚婷等[36]的结果相似。

在基于像元的偏相关分析中，最高温、最低温和降水量对春季植被返青期的影响呈现出明显的空间异质性。从春季植被返青期与最高温的相关性空间分布（图4a）可以看出，约有54.1%的区域返青期与最高温呈负相关关系，通过显著性检验的区域占总研究区的17.1%（$P<0.05$），主要集中分布在

图2 2001—2020蒙古高原年季前6个月最高温、最低温、降水量时空变化趋势

Fig. 2 Spatiotemporal variation trends of the highest temperature, the lowest temperature and precipitation in the pre-season six months on the Mongolian Plateau from 2001 to 2020

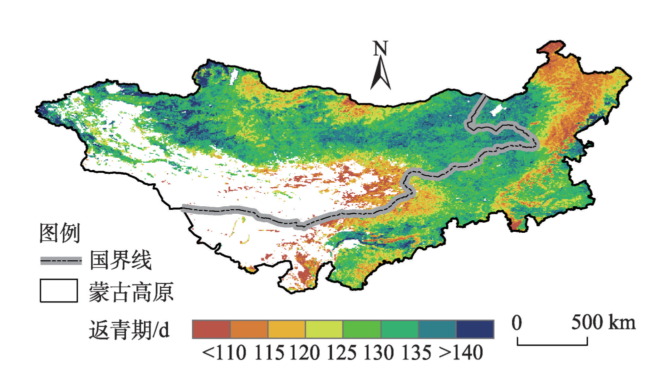


图3 2001—2020蒙古高原植被返青期空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the start of growing season on the Mongolian Plateau from 2001 to 2020

蒙古国萨彦岭北部，肯特山脉东部和内蒙古自治区锡林郭勒草原以及科尔沁沙地。返青期与最高温呈显著正相关关系的区域仅占研究区的12.7%（$P<0.05$），主要零星分布在蒙古国杭爱山脉北部、肯特山脉西部和内蒙古自治区呼伦贝尔草原西部、鄂尔多斯高原毛乌素沙地、河套平原等地区。相比于最高温，返青期与最低温约有57.5%的区域呈负相关关系，返青期与最低温呈显著负相关关系的地区约占研究区的20.1%（$P<0.05$），与返青期同最高温呈现显著正相关关系的区域几乎呈相反分布。其余42.5%的区域返青期与最低温呈正相关关系（图4c），其中，返青期同最低温呈现显著正相关关系的区域较少，仅占研究区的11.2%（$P<0.05$），该地区主要分布在内蒙古自治区锡林郭勒草原和科尔沁沙地。由（图4b、d）可知，季前1~3个月的最高温和最低温对返青期的影响最大，约占整个研究区面积的

59.7%。总体上，昼夜变暖对研究区大部分地区的植被返青期均产生提前作用，大概是温度升高而导致研究区植被生长季普遍提前的原因。进一步研究发现，返青期与最低温呈现显著负相关关系的区域远高于返青期与最高温呈现负相关关系的区域，这表明，相比于白天变暖，夜间变暖更容易促使植被返青期的提前。

分析春季植被返青期与降水之间的相关性空间分布(图4e)后发现，约有58.9%的区域返青期与降水呈负相关关系，呈显著负相关关系的地区占研究区的20.6%(P<0.05)，且集中分布在蒙古国萨彦岭东南部、肯特山脉东部和中国内蒙古自治区锡林郭勒草原及赤峰市北部地区。返青期与降水呈显著正相关关系的区域仅占研究区的11.8%(P<0.05)，其主要位于蒙古国杭爱山脉北部和中国内蒙古自治区呼伦贝尔草原东部等地区。约49.1%的区域降水长度主要集中在返青期之前的1~2个月，而在呼伦贝尔东部则有37.1%的区域集中在季前5~6个月(图4f)。通过上述分析发现，降水对提前植被返青期有更强烈的影响，这说明在蒙古高原这样干旱半干旱的生态系统中，降水是影响植被生长的最主要限制因子。

3.3 不同植被类型返青期对最高温、最低温和降水的响应

不同植被类型返青期与最高温和最低温的相关系数像元比例统计(图5)显示，各植被类型返青期与最低温整体上表现出很强的负相关关系，这表明夜间变暖更有利于植被提前返青。同时，不同植被返青期对最高温、最低温的响应存在很大的差异性。例如，最低温对森林和草地返青期呈负相关关系的像元面积大于最高温，其中，森林通过显著性检验的像元多于草地，占研究区的25.5%(P<0.05)，即夜间变暖更有利于提前森林的返青期，原因可能与森林多分布在高纬度高海拔地区有关系，夜间变

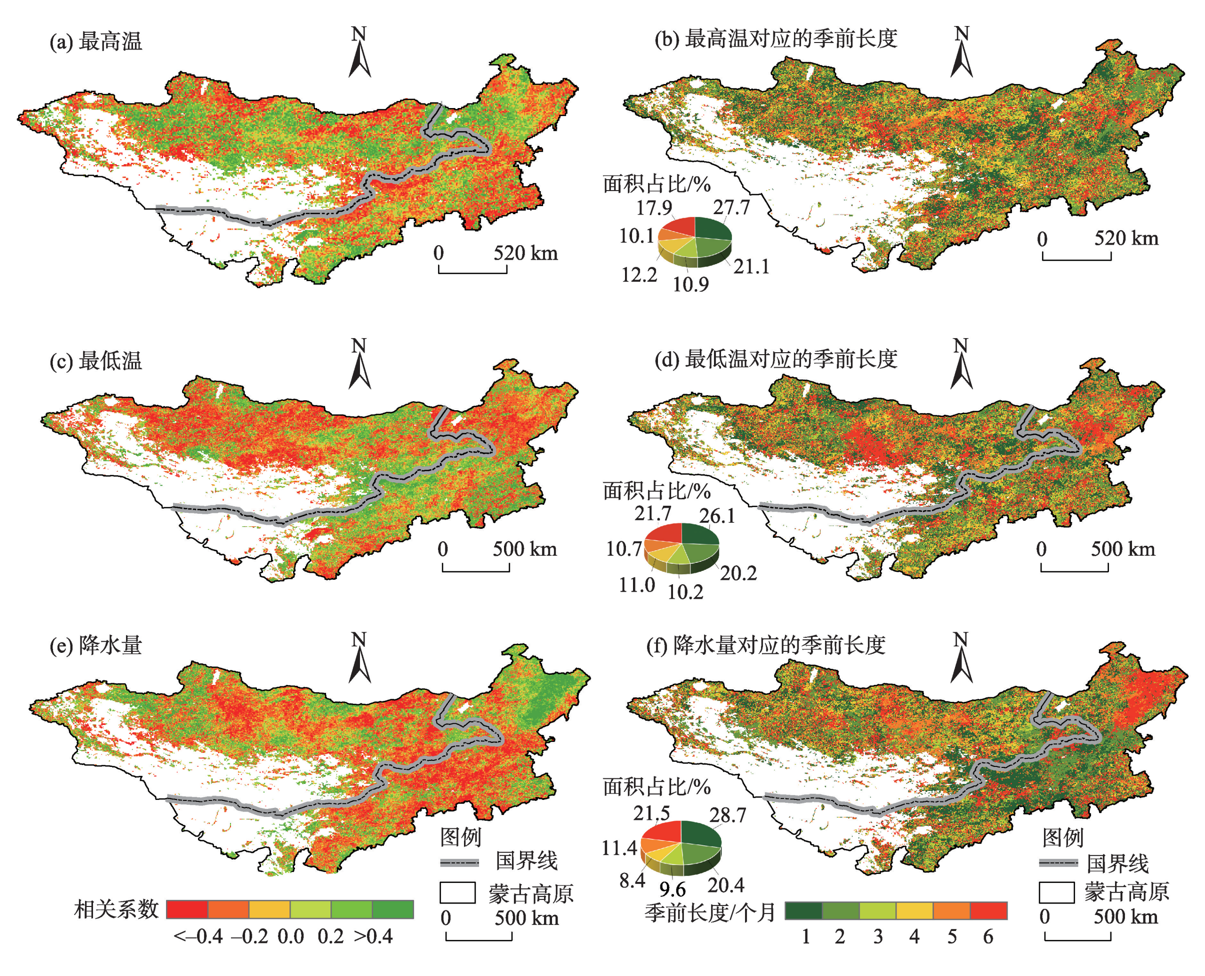
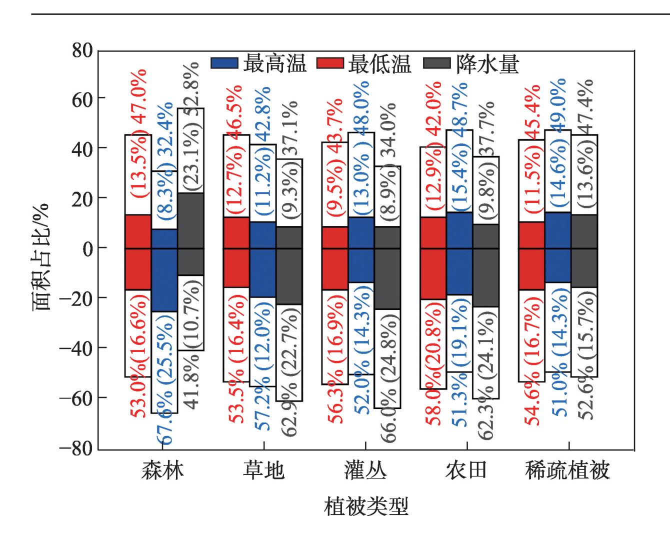


图4 蒙古高原季前最高温、最低温、降水量与返青期最大相关系数及对应季前长度空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of the maximum correlation coefficient and preseason length between the highest temperature, the lowest temperature and precipitation and the start of growing season on the Mongolia Plateau



注:图中红、蓝、黑区域表示通过P<0.05显著性检验的像元百分比。

图5 蒙古高原不同植被类型返青期与季前最高温、最低温和降水量的偏相关性

Fig. 5 Partial correlation between the start of growing season of different vegetation types and pre-season the highest temperature, the lowest temperature and precipitation on the Mongolian Plateau

暖可以有效降低霜冻的风险。然而,对于灌丛、农田和稀疏植被返青期,最高温呈负相关关系的像元面积更多,其中,农田返青期与最高温呈显著负相关关系的像元面积高达20.8%,即白天变暖更有利于提前农田返青期。

研究发现,降水对各植被返青期的影响也存在明显差异,除森林返青期与降水主要表现为显著正相关关系以外,其他植被类型返青期与降水均以显著负相关关系为主。即除森林以外,降水增加对返青期都有明显的提前作用。通过以上研究表明,蒙古高原昼夜增温对各植被类型返青期产生了积极的提前作用,夜间最低温的升高对植被返青期的提前作用更显著,特别是对森林地区。

4 讨 论

由于缺乏地面实测数据的支持,因此需结合前人的研究结果对本研究结果进行验证。本研究采用NDVI的Logistic曲线曲率极值法和EVI的动态阈值法2种产品数据和2种物候识别方法求平均计算的返青期值同前人计算的返青期值进行对比验证,从而检验本研究结果的可行性和准确性(表1)。

通过比较发现,2001—2020年蒙古高原植被返青期和前人的研究包括蒙古高原在内的返青期值基本一致。但即使同样的研究区,由于研究所使用的物候提取方法、观测时长和遥感数据时空分辨率的不同,各研究计算的返青期之间同样存在一定偏差[40]。因此判定,上述研究方法适用于蒙古高原植被返青期的时空变化分析。

近20 a来,蒙古高原地区季前6个月白天温度和夜间温度具有明显的上升趋势,但是白天升温速率和夜间升温速率呈现出非对称性,且昼夜温差表现出逐渐增大的趋势,白天变暖速率是夜间变暖速率的2.3倍,这表明蒙古高原的气温变化与全球变暖的非对称性一致[41]。降水可以强烈地影响这种不对称变化,这主要是由于降水与云量和土壤湿度之间存在密切的联系[42]。已有研究显示,云量、土壤湿度、太阳辐射及大气循环等因素都可能会引起这种不对称变暖,而云量的增加则可能是最主要的原因[43],云层可以降低白天入射到地球表面的短波辐射,从而降低日内的最低气温;并在夜间截获地面反射出的长波辐射来增加日最高气温。尽管有文献从云的角度解释白天增温与夜间增温的原因,但目前还不能明确两者之间的交互作用,需进一步深入探讨。

蒙古高原地处干旱、半干旱区,降水是植被生长的主要水热气象因子,昼夜变暖对提前植被返青期总体表现为积极作用,然而昼夜变暖对植被返青期的影响是不对称的,即夜间温度升高会导致植被返青期提前,白天温度升高会延迟植被返青期。虽然在整个研究区尺度上夜间变暖对返青期的提前作用强于白天,但是昼夜变暖对返青期的影响机制

表1 研究结果同其他方法计算结果比较

Tab. 1 Comparison of the results in this study with those calculated by other methods

研究区	方法	年份	返青期/d	文献
蒙古高原	Logistic曲线曲率极值法和动态阈值法等	2001—2017	105~140	[35]
蒙古国	动态阈值法	2001—2019	110~150	[36]
蒙古高原	Logistic曲线曲率极值法	1982—2011	105~140	[37]
内蒙古自治区	动态阈值法	1982—2013	120~160	[38]
中国北方草地	动态阈值法	1983—2015	100~130	[39]

仍存在一定差异。白天温度升高超过冬季低温的最佳温度阈值的水平，通过延迟季前5~6个月低温需求的满足，使植被发生返青期的时间推迟[44]。而在生长季前2~3个月，白天增温通过增加蒸散发的方式减少土壤含水量，这将会部分或完全抵消其对返青期的提前作用[16]，即导致植被返青期推迟发生。这与Peng等[13]在北半球的研究结果一致。然而，由于夜间低温会达到极端水平，因此在非生长季夜间变暖有利于增加植被抗冻性[45]，即降低霜冻风险消除低温限制[16]，使得植被返青期提前发生。此外，较高的夜间温度可以提供更多的冰和雪的有效土壤水，这是因为受到较低的土壤温度限制的原因[46]。有效土壤水分一旦增加，植被根部就会吸收充足的水分，为植被提前展叶做准备。

植被物候动态变化是对全球气候的一种综合响应，气候变化是影响植被物候动态变化的主要影响因子。本文重点讨论了水热气候条件中的温度和降水，在今后的研究中，应考虑其他气候因素如湿度、蒸发和日照时间以及人为因素等对植被物候动态变化的影响。此外，植被对气候变化的响应通常存在一定的滞后效应，同时植被生长的各个阶段对气候变化的滞后时间也存在差异[2]，这些因素必然会影响到研究的准确性。因此，在未来的研究中，需要综合各种因素，运用各种方法如控制实验、建立数学模型等进一步厘清非对称昼夜增温对不同植被物候变化的作用机制。

5 结 论

本文利用2001—2020年植被指数NDVI和EVI、逐月最高温、最低温以及降水量数据，在分析过去20 a蒙古高原最高温、最低温和降水量变化的基础上，研究了其对植被返青期的影响及其差异，得到了以下结论：

（1）蒙古高原2001—2020年植被季前最高温的增速是最低温增速的2.3倍，昼夜变暖速率存在非对称性且在空间格局上同样存在明显差异，昼夜温差呈增大的趋势。

（2）蒙古高原植被返青期对昼夜非对称变暖的响应具有不同的特征，在季前长度和空间尺度上表现出明显差异。在季前长度上，季前1~3个月的最高温和最低温对返青期的影响最大，其中最高温的影响范围大于最低温；在空间分布上，相比于最高温，最低温升高对植被返青期影响程度更大，影响范围更为广泛，且多表现为提前作用。

（3）蒙古高原昼夜非对称变暖对不同植被类型的返青期总体上产生了积极的提前作用，从对不同植被类型的影响程度来看：白天变暖对灌丛、农田和稀疏植被影响显著，夜间变暖对植被的影响更加显著，尤其是森林地区。

参考文献（References）

[1] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21(3): 128911666, doi: 10.1029/2006gb002888.

[2] Wu D H, Zhao X, Liang S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change[J]. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520–3531.

[3] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(51): 22151–22156.

[4] Shen M G, Piao S L, Chen X Q, et al. Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau[J]. Global Change Biology, 2016, 22(9): 3057–3066.

[5] Liu Q, Fu Y S, Zhu Z C, et al. Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology[J]. Global Change Biology, 2016, 22(11): 3702–3711.

[6] Welch J R, Vincent J, Auffhammer M, et al. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(33): 14562–14567.

[7] Badeck F W, Bondeau A, Böttcher K, et al. Responses of spring phenology to climate change[J]. New Phytologist, 2004, 162(2): 295–309.

[8] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. Greening of the earth and its drivers[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(8): 791–795.

[9] Cong N, Shen M G, Yang W, et al. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland[J]. International Journal of Biometeorology, 2017, 61(8): 1433–1444.

[10] Zhang B W, Cui L L, Shi J, et al. Vegetation dynamics and their response to climatic variability in China[J]. Advances in Meteorology, 2017, 2017(14): 1–10.

[11] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[12] Davy R, Esau I, Chernokulsky A V, et al. Diurnal asymmetry to

the observed global warming[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(1): 79–93.

[13] Peng S S, Piao S L, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation[J]. Nature, 2013, 501(7465): 88–92.

[14] Ma L Q, Xia H M, Meng Q M. Spatiotemporal variability of asymmetric daytime and night-time warming and its effects on vegetation in the Yellow River Basin from 1982 to 2015[J]. Sensors (Basel), 2019, 19(8): 1832, doi: 10.3390/s19081832.

[15] Xu L, Myneni R B, Chapin Iii F S, et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(6): 581–586.

[16] Piao S L, Tan J G, Chen A P, et al. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6911, doi: 10.1038/ncomms7911.

[17] Shen X J, Liu B H, Henderson M, et al. Asymmetric effects of daytime and nighttime warming on spring phenology in the temperate grasslands of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 240–249.

[18] Luo M, Meng F H, Sa C L, et al. Response of vegetation phenology to soil moisture dynamics in the Mongolian Plateau[J]. Catena, 2021, 206: 105505, doi: 10.1016/j.catena.2021.105505.

[19] 魏云洁, 甄霖, Ochirbat Batkhishig, 等. 蒙古高原生态服务消费空间差异的实证研究[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1677–1684. [Wei Yunjie, Zhen Lin, Ochirbat Batkhishig, et al. Empirical study on consumption of ecosystem services and its spatial differences over the Mongolian Plateau[J]. Resources Science, 2009, 31(10): 1677–1684.]

[20] 刘钟龄. 蒙古高原景观生态区域的分析[J]. 干旱区资源与环境, 1993, 7(3): 256–261. [Liu Zhongling. Analysis of landscape ecoregion on the Mongolian Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 1993, 7(3): 256–261.]

[21] 杜佳梦, 包刚, 佟斯琴, 等. 1982—2015年蒙古国植被覆盖变化及其与气候变化和人类活动的关系[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 1–13. [Du Jiameng, Bao Gang, Tong Siqin, et al. Variations in vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Mongolia during the period[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 1–13.]

[22] 温都日娜, 包玉海, 银山, 等. 2000—2014年蒙古高原植被覆盖时空变化特征及其对地表水热因子的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1345–1356. [Wen Durina, Bao Yuhai, Yin Shan, et al. The spatial and temporal variation of vegetation cover in Mongolian Plateau and its response to surface hydrothermal factors from 2000 through 2014[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1345–1356.]

[23] 包刚, 包玉海, 覃志豪, 等. 近10年蒙古高原植被覆盖变化及其对气候的季节响应[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 613–621. [Bao Gang, Bao Yuhai, Qin Zhihao, et al. Vegetation cover changes in Mongolian Plateau and its response to seasonal climate changes in recent 10 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 613–621.]

[24] Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1599–1608.

[25] Yu F F, Price K, Ellis J, et al. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern Central Asia[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(1): 42–54.

[26] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255–1268. [Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255–1268.]

[27] 丁明军, 张镱锂, 孙晓敏, 等. 近10年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析[J]. 科学通报, 2012, 57(33): 3185–3194. [Ding Mingjun, Zhang Yili, Sun Xiaomin, et al. Temporal and spatial variation of alpine grassland phenology over Qinghai-Tibet Plateau in recent 10 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(33): 3185–3194.]

[28] Garonna I, Jong R D, Wit A D, et al. Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982—2011)[J]. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3457–3470.

[29] Roerink G R, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 21(9): 1911–1917.

[30] Hou X H, Gao S A, Niu Z, et al. Extracting grassland vegetation phenology in north China based on cumulative spot-vegetation NDVI data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(9): 3316–3330.

[31] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. Global Change Biology, 2006, 12(4): 672–685.

[32] Bao G, Chen J Q, Chopping M, et al. Dynamics of net primary productivity on the Mongolian Plateau: Joint regulations of phenology and drought[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 81: 85–97.

[33] 元志辉, 雷军, 包刚, 等. 土地利用/覆盖变化对浑善达克沙地植被覆盖度的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 330–338. [Yuan Zhihui, Lei Jun, Bao Gang, et al. The impacts of land use/cover change on vegetation coverage in the Otindag Sandland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 330–338.]

[34] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 47–58. [Zhang Geli, Xu Xingliang, Zhou Caiping, et al. Responses of grassland vegetation to climatic variations on different temporal scales in Hulun Buir Grassland in the past 30 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 66(1): 47–58.]

[35] 姜康, 包刚, 乌兰图雅, 等. 2001—2017年蒙古高原不同植被返青期变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2490-2499. [Jiang Kang, Bao Gang, Wulantuya, et al. Variations in spring phenology of different vegetation types in the Mongolian Plateau and its responses to climate change during 2001—2017[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(8): 2490-2499.]

[36] 邵亚婷, 王卷乐, 严欣荣. 蒙古国植被物候特征及其对地理要素的响应[J]. 地理研究, 2021, 40(11): 3029-3045. [Shao Yating, Wang Juanle, Yan Xinrong. The phenological characteristics of Mongolian vegetation and its response to geographical elements[J]. Geographical Research, 2021, 40(11): 3092-3045.]

[37] 包刚, 包玉龙, 阿拉腾图娅, 等. 1982—2011年蒙古高原植被物候时空动态变化[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 866-874. [Bao Gang, Bao Yulong, A Latengtuya, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation phenology in the Mongolian Plateau during 1982—2011[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5): 866-874.]

[38] 黄文琳, 张强, 孔冬冬, 等. 1982—2013年内蒙古地区植被物候对干旱变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4953-4965. [Huang Wenlin, Zhang Qiang, Kong Dongdong, et al. Response of vegetation phenology to drought in Inner Mongolia from 1982 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4953-4965.]

[39] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等. 中国北方草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4099-4107. [Qin Gexia, Wu Jing, Li Chunbin, et al. Grassland vegetation phenology change and its response to climate changes in north China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4099-4107.]

[40] 元志辉, 银山, 萨楚拉, 等. 近20 a呼和浩特市城市化对植被物候的影响[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1890-1898. [Yuan Zhihui, Yin Shan, Sa Chula, et al. Effects of urbanization on vegetation phenology in Hohhot in the recent 20 years[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1890-1898.

[41] Xia J Y, Chen J Q, Piao S L, et al. Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(3): 173-180.

[42] Zhou L M, Dai A G, Dai Y J, et al. Spatial dependence of diurnal temperature range trends on precipitation from 1950 to 2004[J]. Climate Dynamics, 2008, 32(2): 429-440.

[43] Du Z Q, Zhao J, Liu X J, et al. Recent asymmetric warming trends of daytime versus nighttime and their linkages with vegetation greenness in temperate China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(35): 35717-35727.

[44] Schwartz M D, Hanes J M. Continental-scale phenology: Warming and chilling[J]. International Journal of Climatology, 2009, 30(11): 1595-1598.

[45] Vitasse Y, Lenz A, Korner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 541, doi: 10.3389/fpls.2014.00541.

[46] Yi S H, Li N, Xiang B, et al. Representing the effects of alpine grassland vegetation cover on the simulation of soil thermal dynamics by ecosystem models applied to the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(3): 1186-1199.

Effects of asymmetric warming of daytime and nighttime on the start of growing season on the Mongolian Plateau from 2001 to 2020

ZHANG Gangdong[1,2], BAO Gang[1,2], YUAN Zhihui[1,2], WEN Durina[1,2]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing & Geography Information System, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China)

Abstract: Two phenological identification methods, namely, the logistic curve curvature extreme value method and the dynamic threshold method of cumulative NDVI, were used to extract the data based on the normalized difference vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index remote sensing vegetation indices from 2001 to 2020, as well as the highest temperature, the lowest temperature, and precipitation data of 94 meteorological stations in the Mongolian Plateau. The temporal and spatial changes of the Mongolian Plateau's asymmetric circadian warming and its impact on the start of growing season were analyzed. The research shows the following: (1) The average maximum temperature [0.7 ℃·$(10a)^{-1}$] and the minimum temperature [0.3 ℃·$(10a)^{-1}$] in the preseason 6 months (November of the previous year to April of the current year) in the Mongolian Plateau from 2001 to 2020 both showed an upward trend, and the warming rate of the highest temperature was 2.3 times that of the lowest temperature. (2) The asymmetric warming of the preseason day and night has an early effect on the start of growing season; however, compared with the highest temperature, the lowest temperature has a greater impact on the start of growing season, and the impact range is wider. (3) The preseason asymmetrical warming of day and night has different effects on the start of growing season of different vegetation types. The effect of daytime warming on the start of the growing season of shrubs, farmland, and sparse vegetation is more obvious, and the effect of nighttime warming on the start of the growing season of forest and grassland is more obvious, especially in forest areas (25.5%). Studying the effects of daytime and nighttime asymmetric warming on vegetation phenology on the Mongolian Plateau is of great significance to reveal the mechanism of temperature effects on vegetation phenology in spring.

Key words: the highest temperature; the lowest temperature; asymmetric warming; start of growing season; Mongolian Plateau